

令和 3 年 4 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04557

研究課題名（和文）CFRPラティス構造の衝撃減衰特性に関する研究

研究課題名（英文）Study on shock attenuation properties of CFRP lattice structures

研究代表者

横関 智弘（Tomohiro, Yokozeki）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・准教授

研究者番号：50399549

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：CFRPラティス構造の衝撃減衰応答についての解析モデルの構築を目指し、ラティス構造特有のユニットセルを用いた、効率的な衝撃応答予測を可能とする数値解析モデルの開発を行った。材料の減衰以外の幾何学的効果による応答低減が達成される可能性を検証するために、ユニットセルの幾何形状を変化させた場合の解析を実施し、所望の周波数領域の衝撃減衰を向上させることが可能であることを解析的に示し、ラティス構造特有のストップバンドの存在を明らかにした。ラティス構造の幾何特性を変化させることでストップバンドの設計が可能となり、幅広い帯域の減衰が可能となるラティス構造を示し、軽量高減衰構造の有用な基盤が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

CFRPを用いたラティス構造に対応した効率的な予測モデルを開発し、ラティス構造の形状を工夫することで、ロケット等の宇宙構造の軽量性能を維持したまま衝撃減衰性能を高めるための設計指針を得ることに成功した。所望の減衰特性をもつ構造を設計する技術を獲得したことにより、ロケットなどの航空宇宙構造物の更なる軽量化が期待できる。

研究成果の概要（英文）：Shock attenuation properties of CFRP lattice structures are focused on and an efficient numerical simulation tool was developed considering the periodic lattice geometry. Numerical models predicted shock attenuation except for material damping due to geometrical effect of lattice structures. It was confirmed that lattice structures prevent waves with specific frequency ranges from propagation, and this stop-band characteristics can be designed. This study demonstrated that CFRP lattice structures can be utilized for light-weight high attenuation aerospace structures.

研究分野：航空宇宙構造力学

キーワード：軽量宇宙構造 複合材料 減衰性能

1. 研究開始当初の背景

宇宙ロケット構造、搭載される人工衛星、及びそれらの機器類は、ロケットの各段分離時やパネル・機器の展開時などに使用される火工品により、厳しい衝撃荷重にさらされる。そのため、宇宙機構造には、人工衛星等に加わる衝撃荷重環境を評価すること、及びその衝撃荷重環境を低減することが求められている(NASA Technical Standard, Pyroshock Test Criteria (NASA-STD-7003A))。宇宙機構造は極限的な軽量構造が求められている一方で、衝撃環境低減に寄与する減衰能は、同じ材質・構造の場合質量に比例することから、軽量性と高減衰性は相反する特性にある。現状では、種々の既存構造(ハニカム構造、トラス構造、円筒シェル構造、リングフレーム構造等)に対して火工品を用いた膨大な試験データを蓄積し、それぞれの構造の火工品衝撃に対する衝撃特性や減衰特性を実験的評価し、設計が行われている。また、衝撃環境の低減に関しては、構造材料が有する減衰特性のほか、接合部等の不連続部による衝撃低減、ダンパーを用いた衝撃低減法などが採用され、重量増を招く等のデメリットもある。より性能の高い宇宙機構造の実現のためには、軽量性と減衰能を両立しうる材料・構造の開発が求められている。

軽量性と減衰能を両立しうる構造様式として CFRP ラティス構造に着目した。この構造は、図1に示すような互いに交差する螺旋方向の梁と周方向の梁から成る格子構造である。CFRP ラティス構造は、従来構造(スキン/ストリंगाー構造等)と比較して軽量・低コスト・一体成形といったメリットが期待され、宇宙ロケットの人工衛星搭載部や複数段式宇宙ロケットの段間部構造のような軽量性が求められる航空宇宙構造に対して、優れた候補と考えられているためである。そこで、「ラティス構造は、多数の分岐・節を有する構造であるため、上述の振動・衝撃環境を緩和することにも有用ではないか?」と考え、この CFRP ラティス構造の衝撃減衰特性について、そのメカニズムを明らかにし、宇宙機構造に適した軽量かつ高減衰構造の実現に向けた研究を立ち上げたいとの背景があった。

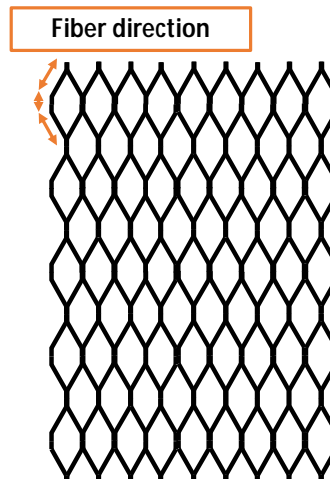


図1 CFRP ラティス構造

2. 研究の目的

本研究では、軽量航空宇宙構造として航空機構造や宇宙機構造への適用が検討されている CFRP ラティス構造について、衝撃減衰の観点からも有用な構造様式ではないか?との着想から、宇宙機構造に適した軽量かつ高減衰構造としての適用を想定し、CFRP ラティス構造の振動・衝撃減衰特性を明らかにすることを目指した。CFRP ラティス構造の衝撃伝播特性を簡易的にまた高精度に計算する手法を検討・構築し、CFRP ラティス構造の衝撃減衰メカニズムを明らかにし、減衰構造の設計指針を獲得することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では CFRP ラティス構造の衝撃減衰特性について、ラティス構造の幾何特性を効率的に反映可能な数値解析手法を構築し、CFRP ラティス構造の衝撃減衰メカニズムを明らかにすることを主目的とし、3年間で研究を実施した。そのため、実機構造としてはロケット構造など、円筒構造が考えられるが、本研究ではメカニズム解明を主眼とし、CFRP ラティス平板を対象とし研究を進めた。CFRP ラティス平板を簡易化のため梁要素でモデル化し、衝撃応答を、ラティス特有の周期構造を考慮したスペクトル解析手法により簡易に計算・予測するための設計解析手法に取り組み、1次元的な波動伝播、さらには2次元伝播へと拡張して開発し、最終的には軽量減衰構造を実現するための設計指針を見出す。

4. 研究成果

ラティス構造特有の周期構造特性を利用し、図2のようなユニットセルを対象として、Blochの定理[1]を適用し波動伝播解析を試みた。ラティス構造自体は有限要素法により梁モデルでモデル化し、質量マトリックス及び剛性マトリックスを計算し、図2の左側から右側へ1次元的に伝播する波を対象として、左端と右端の節点自由度を伝播係数により関係づけることにより波の伝播特性を解析した。

図3に解析結果の一例を示す。用いたユニットセルモデルによる手法は、各周波数における伝播係数の実部が非ゼロとなった場合に減衰すると考えられ、その周波数領域を色付けして表している。比較のため、ラティス構造の1次元フルスケール(多数ユニット)の有限要素モデルの過渡応答解析によって得られた周波数応答を示す。色付けした領域は減衰していることが確認でき(ストップバンド)、ユニットセルモデルにより衝撃減衰特性を予測できることが確認でき

た。

この減衰の周波数特性は、ラティス構造の幾何形状により変化し、例えば、ラティスのリブ角度()を変化させることで、ストップバンド性能を設計可能である。実例として、図4のようリブ角を変化させたモデルでの減衰性能は、図5のようになり、ストップバンド領域が図3に比べかなり広域にひろがっていることが確認できる。

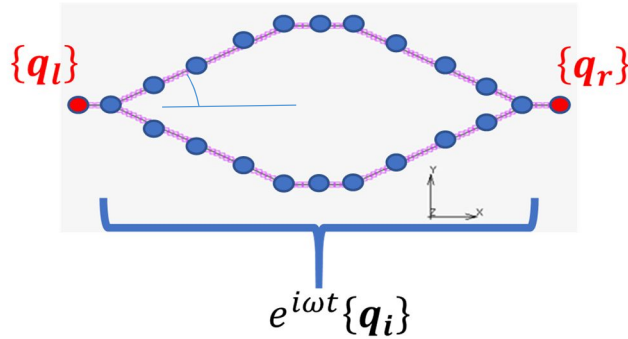


図2 有限要素モデルによるラティス構造の波動伝播解析モデル

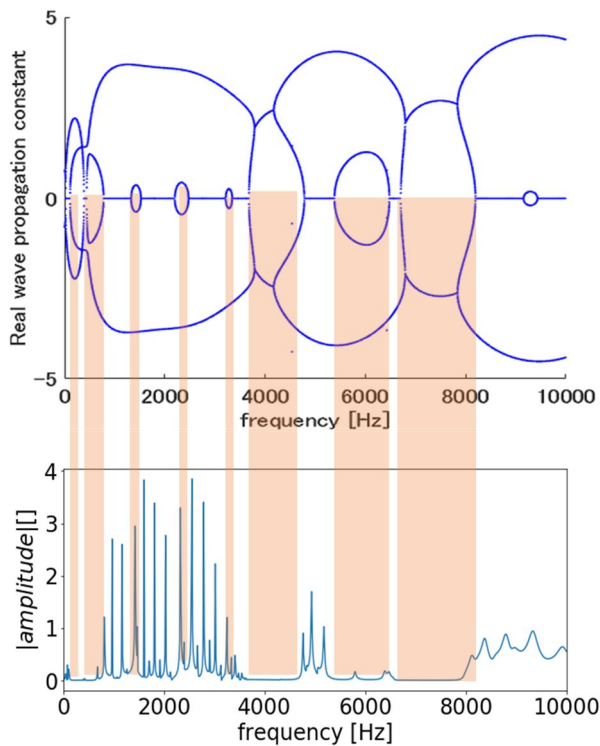


図3 $\approx 26.3^\circ$ のラティス構造の曲げ波モードの減衰特性 (上: ユニットモデル解析、下: フルスケールの過渡応答)

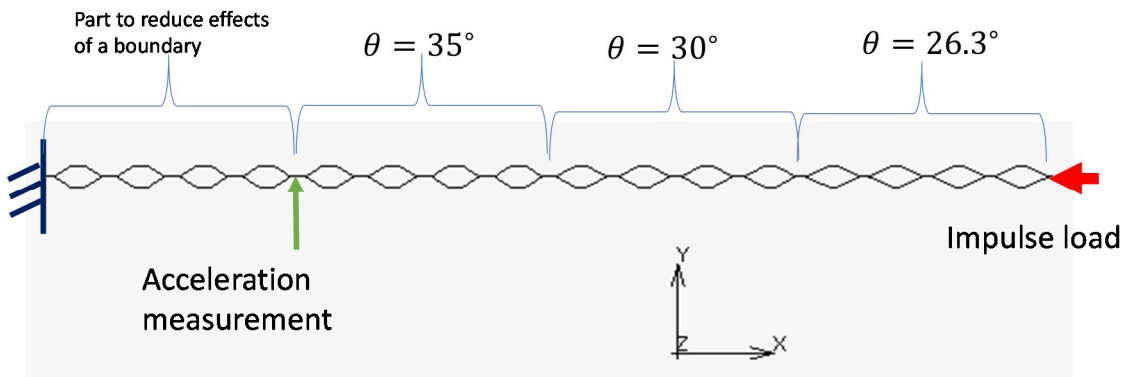


図4 組み合わせラティス構造

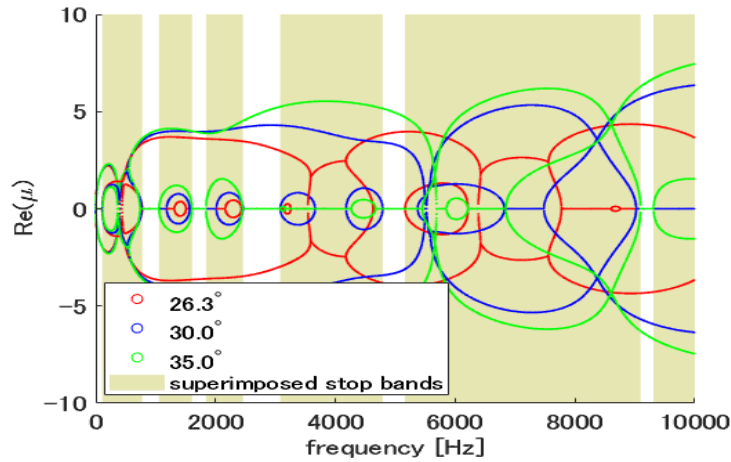


図5 組み合わせラティスのストップバンド特性

同様の手法を2次元の波動伝播へと拡張することで、2次元的な衝撃伝播特性を効率的に解析することを試みた。図6のような2次元ラティス構造について2方向(x方向とy方向)の伝播係数を考慮し(上端と下端の自由度も関係づけ)解析を行った。比較として2次元ラティスのフルスケールモデルによる過渡応答解析も実施した。図7にフルスケールモデルとユニットモデルの比較を示す。フルスケールモデルでは、0°方向(A)に伝播する波と20°方向(B)に伝播する波の周波数応答を示しているが、赤丸で示す4000Hzの波は0°方向、20°方向ともに減衰しており、緑丸で示す8000Hzの波は0°方向では減衰せず、20°方向で減衰する。この結果はユニットモデルによる極プロット(径方向:周波数、周方向:伝播方向)でも確認でき、青点がない領域は波が伝播しないことを示していることから、4000Hz付近では0°方向から20°方向には伝播せず、8000Hz付近では0°方向には伝播するが、20°方向には伝播しないことが予測できている。2次元ラティスにおいても幾何形状の組み合わせで伝播方向や伝播する周波数を設計できることも確認できており、減衰構造の設計指針を得ることができる。

以上から、軽量構造として期待されるCFRPラティス構造は、減衰性能を期待でき、設計できる構造として利用が期待される。本研究成果により、軽量減衰構造の設計手法を構築することができた。

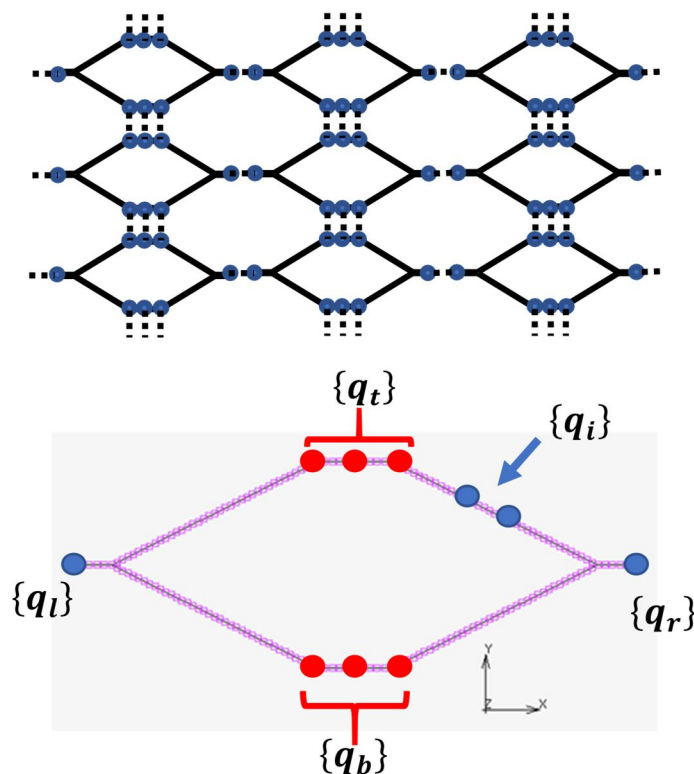


図6 2次元ラティス構造の有限要素モデル

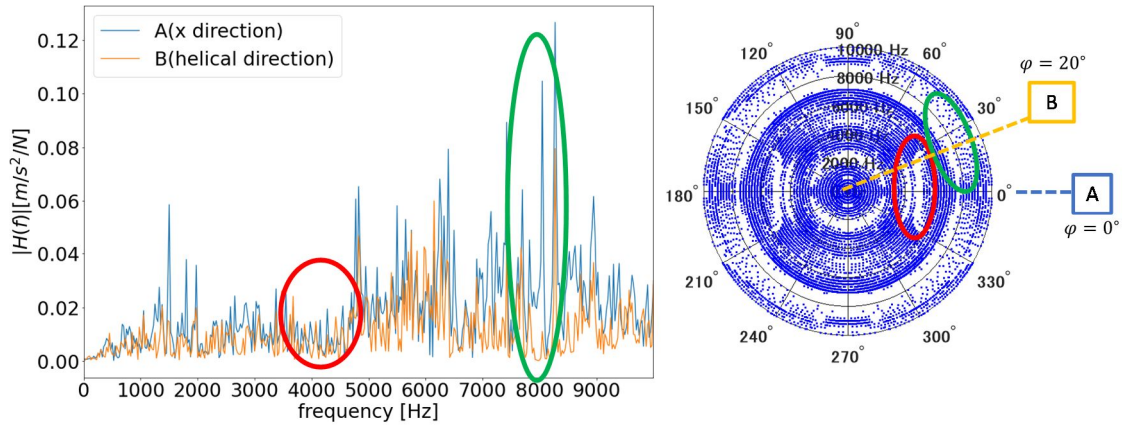


図7 フルスケールモデルによる周波数応答（左）とユニットモデルによる極プロット（右）

引用文献

- [1] Brillouin L. Wave propagation in periodic structures: electric filters and crystal lattices. 1953.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Iwata Yoshimasa, Yokozeki Tomohiro	4. 巻 261
2. 論文標題 Wave propagation analysis of one-dimensional CFRP lattice structure	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 113306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compstruct.2020.113306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iwata Yoshimasa, Yokozeki Tomohiro	4. 巻 265
2. 論文標題 Shock wave filtering of two-dimensional CFRP X-lattice structures: A numerical investigation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Composite Structures	6. 最初と最後の頁 113743
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.compstruct.2021.113743	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Y. Iwata, V. Kumar, T. Yokozeki
2. 発表標題 Vibration analysis of CFRP lattice structure
3. 学会等名 15th Japan International SAMPE Symposium and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukihiko Hanaya, Tomohiro Yokozeki
2. 発表標題 Evaluation of buckling behavior of X-lattice CFRP curved plate
3. 学会等名 Indo-Japan Workshop 2018 on Highly Conductive CFRP (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 花谷有紀彦, 横関智弘、他
2. 発表標題 X-ラティスCFRP曲面板の座屈挙動評価
3. 学会等名 第60回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩田佳将、横関智弘
2. 発表標題 CFRPラティス構造における振動伝播予測
3. 学会等名 第62回構造強度に関する講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
インド	IIT Kharagpur		